

PROCEDE D'AMELIORATION DE LA SURETE DES SYSTEMES NUCLEAIRES
HYBRIDES COUPLES, ET DISPOSITIF METTANT EN ŒUVRE CE PROCEDE

Domaine technique

La présente invention se rapporte à un procédé de commande d'un système nucléaire hybride sous critique ayant une source commandée de neutrons externes et à un dispositif
5 mettant en œuvre ce procédé, notamment pour l'amélioration de la sûreté de systèmes nucléaires hybrides, qu'ils soient affectés à la production d'énergie et/ou à la transmutation de certains éléments chimiques transuraniens présents dans les déchets nucléaires (« incinération des déchets »).

10 Elle se rapporte également à un système nucléaire hybride faisant application de ce procédé.

État de la technique

La maîtrise de la réaction nucléaire mise en œuvre dans
15 une centrale nucléaire et la limitation de la quantité de déchets produite par cette réaction sont deux problèmes majeurs de l'industrie nucléaire, ces problèmes de sécurité et de production de déchets variant en fonction du système utilisé pour exploiter la réaction nucléaire.

20 A cet effet, il convient de rappeler que ces systèmes peuvent être classés en fonction de leur criticité, un système étant qualifié de critique lorsque le nombre de neutrons émis par fission du combustible nucléaire est égal au nombre de neutrons disparaissant par absorption et par fuite. Dans ce cas,
25 le nombre de fissions observé pendant des intervalles de temps successifs reste constant, la criticité étant l'expression d'un équilibre exact entre les productions de neutrons par fission et les disparitions de neutrons par absorption et par fuite.

Inversement, un système est qualifié de sous-critique
30 lorsque le nombre de neutrons émis par fission est plus faible que le nombre de neutrons disparaissant par absorption et par fuite. Dans ce cas, le nombre de fissions observé pendant des intervalles de temps successifs décroît et la réaction nucléaire s'atténue en intensité.

Le comportement de ces systèmes est généralement
35 caractérisé par le facteur de multiplication k qui représente la valeur

moyenne du nombre de nouvelles fissions induites par les neutrons issus d'une fission initiale. On peut l'exprimer, pour un intervalle de temps donné, par le rapport entre le nombre de neutrons produit par fissions et le nombre de neutrons disparus. Dans le cas où ce coefficient tient compte des fuites des neutrons vers les assemblages de combustible voisins ou hors du réacteur, celui-ci est qualifié d'effectif et noté k_{eff} . Pour un réacteur sous critique, k_{eff} est inférieur à 1, mais proche de 1 (typiquement de l'ordre de 0,95 à 0,995). Pour un réacteur critique, k_{eff} est égal à 1.

Ses variations autour de la valeur critique de 1 sont représentées par la réactivité, grandeur sans dimension définie par :

$$\rho = (k_{\text{eff}} - 1)/k_{\text{eff}}$$

Sa valeur étant très petite, elle est généralement exprimée en cent millièmes, en prenant pour unité le pcm (pour cent mille). Dans un réacteur, la réactivité est nulle lorsqu'il est critique, positive s'il est surcritique et négative s'il est sous-critique

Un réacteur sous-critique doit faire appel à une source externe de neutrons afin de maintenir la réaction nucléaire. Les neutrons apportés par cette source sont qualifiés de neutrons externes. Cette source de neutrons externe devant être intense, elle est généralement réalisée par des réactions nucléaires, essentiellement de spallation, induites par l'impact de particules chargées de haute énergie (0,6 à 1,2 GeV), généralement des protons ou des deutons, sur une cible composée de préférence d'éléments lourds comme par exemple du plomb, du bismuth ou de l'uranium. Ces neutrons externes doivent toutefois avoir une énergie du même ordre de grandeur que les neutrons entretenant la réaction du cœur afin d'avoir l'efficacité optimale, ce qui est aisé à réaliser avec des neutrons de spallation ; s'ils sont trop rapides, on peut les ralentir par des techniques connues de l'homme du métier.

La cible de spallation se présente généralement sous forme d'un liquide plomb-bismuth contenu dans un réservoir placé au centre du cœur afin d'optimiser la probabilité de réaction avec le matériau combustible. Ce mélange se comporte du point de vue de la

génération de neutrons comme le plomb, mais présente l'avantage d'une plus grande aptitude à la liquéfaction sous l'effet de l'énergie apportée par le faisceau de particules (température de liquéfaction inférieure) à la cible. L'usage d'une cible de plomb-bismuth améliore le
5 comportement thermique de cette cible pour le fonctionnement nominal du réacteur. Si les dimensions de cette cible sont suffisantes, on peut estimer qu'un proton de 1 GeV projeté sur une cible de plomb ou de plomb-bismuth peut ainsi générer de 20 à 25 neutrons utilisables par le réacteur.

10 Les protons peuvent être accélérés par tout moyen apte à leur communiquer une énergie de l'ordre de quelques dizaines de mégaélectronvolts (MeV) à quelques dizaines de gigaélectronvolts (GeV). Ces moyens comportent généralement un accélérateur situé à l'extérieur du réacteur, dont le faisceau est dirigé jusqu'à la cible de
15 spallation située dans le cœur.

Hormis la spallation, toute autre source de neutrons peut convenir. On peut citer à titre d'exemple les réactions photo-nucléaires dont le rendement de conversion est beaucoup
20 moins élevé que les réactions de spallation. Dans ces deux cas, les neutrons produits ont une énergie comparable, adéquate pour le fonctionnement d'un système hybride.

Les réactions photonucléaires sont ici considérées globalement, c'est à dire composées de deux réactions
25 successives. La première est une réaction de Bremsstrahlung, où des électrons réagissent pour donner lieu à des photons de haute énergie selon une section efficace linéaire en fonction de l'énergie des électrons. Le spectre d'énergie des photons produits est très large, compris entre zéro et l'énergie des
30 électrons incidents. La seconde réaction produite est la réaction photo-nucléaire proprement dite, cette seconde réaction impliquant des phénomènes analogues à une réaction de spallation .

Ces réactions photonucléaires délivrent des intensités de
35 neutrons produits inférieures (actuellement, jusqu'à environ 5.10^{16}

neutrons/s, alors que la spallation autorise jusqu'à quelques 10^{18} neutrons/s). Toutefois elles impliquent des coûts très inférieurs pour la génération et l'accélération des électrons (investissement de l'installation environ dix fois inférieur), et pour l'utilisation en raison
5 d'une haute fiabilité et du niveau de qualification moins élevé du personnel. L'installation sera beaucoup plus compacte, mais la consommation d'énergie par neutron produit sera environ trente fois plus élevée.

Les réacteurs hybrides sont à priori connus pour leur
10 aptitude à recevoir dans leur cœur une partie de déchets nucléaires, notamment les éléments radioactifs à vie longue comme des éléments transuraniens ou certains produits de fission, afin de les « incinérer » (c'est-à-dire les transmuter en
15 noyaux stables ou radioactifs à vie courte). Cependant l'introduction des éléments transuraniens entraîne une dégradation grave de certaines propriétés très importantes pour la sûreté du réacteur nucléaire, particulièrement une diminution de la fraction de neutrons retardés et une diminution de l'effet Doppler.

20 Cet effet Doppler est dû à la variation de la vitesse relative d'un neutron se déplaçant dans la matière par rapport aux noyaux, qui ne sont pas immobiles mais soumis à une agitation thermique. Ces petites différences de vitesse relative sont en général négligeables sauf si les sections efficaces varient très brutalement en fonction de cette
25 vitesse relative neutron/noyau, comme c'est le cas au voisinage des pics de résonances. Une augmentation locale de la température du combustible d'un réacteur nucléaire a pour effet immédiat d'élargir les sections efficaces résonnantes de capture de neutrons d'une certaine énergie et donc de faire chuter localement le flux de neutrons.
30 Davantage de neutrons sont capturés et donc ceux qui sont disponibles pour de nouvelles fissions sont moins nombreux.

Dans ce cas, l'effet Doppler est caractérisé par un coefficient négatif et contribue à rendre les systèmes nucléaires intrinsèquement sûrs.

Parmi les effets agissant sur la réactivité d'un réacteur, l'effet Doppler est le plus rapide et le plus sensible. Il constitue un facteur auto-stabilisateur essentiel à la régulation du réacteur car il est spontané et d'autant plus puissant que la
5 perturbation (variation de la température) qui l'a créé est plus importante.

Dans un réacteur nucléaire la grande majorité des réactions de fission donne lieu immédiatement à l'émission de quelques neutrons ; mais un très petit nombre de ces neutrons
10 (moins de 1% des neutrons émis) sont dits retardés car ils sont émis par des fragments de fission avec un retard de quelques secondes en moyenne après la fission. Ce sont eux qui, par ce décalage dans le temps, permettent in fine le pilotage des réacteurs. Cette fraction de neutrons retardés est désignée par
15 β (typiquement de l'ordre de 0,65% pour un combustible fondé sur de l'uranium 235).

La valeur de la fraction des neutrons retardés β est extrêmement importante pour la sûreté et pour le pilotage d'un réacteur nucléaire, car ce paramètre (avec le temps moyen
20 d'apparition des neutrons retardés) définit la période propre du réacteur. Celle-ci doit être suffisamment grande pour permettre la commande du système.

Cette dégradation significative des paramètres de sûreté décrite ci-dessus (du coefficient Doppler et de la fraction des neutrons
25 retardés) rend très problématique la transmutation des déchets nucléaires dans les réacteurs critiques classiques. Elle agit très différemment selon le type fonctionnel auquel est rattaché le système, de sorte que chacun présente des défauts et des qualités propres.

On rappelle à cet effet que les systèmes nucléaires sous-
30 critiques peuvent être fonctionnellement répartis en deux types schématisés à l'aide des figures 1a et 1b, sur lesquelles sont représentés un réacteur 102, en régime sous-critique, recevant des neutrons externes 104 produits par réaction nucléaire (notamment de spallation) sur une cible 108 à l'aide d'un faisceau de particules
35 chargées 106 (par exemple des protons) issues d'un accélérateur 100,

alimenté par le réseau électrique 110. Ce même réseau reçoit par ailleurs l'énergie électrique produite à partir de la chaleur générée par le réacteur sous-critique 102.

Selon un premier type de système dit découplé ou, en anglais, « Accelerator Driven System » (ADS) (figure 1a), l'intensité de la source externe de neutrons est indépendante de la puissance du cœur, et l'énergie nécessaire à l'alimentation de cette source est prélevée sur un réseau électrique comme représenté sur la figure 1a. Dans ce système c'est l'intensité de la source externe qui définit la puissance de l'installation nucléaire, et le cœur sous-critique ne sert qu'à amplifier les neutrons externes et l'énergie déposée via la réaction de fission. Dans de tels systèmes le niveau de sous-criticité étant prédéterminé dans l'état nominal, par exemple en fonction des conditions de sûreté que l'on se fixe, du combustible, et de la puissance thermique souhaitée. Il peut être ajusté au cours du fonctionnement du réacteur. L'intensité du faisceau de particules est prédéterminée en fonction des conditions de fonctionnement demandées au réacteur, puis ajustée en cours de fonctionnement par un opérateur.

Cependant, compte tenu de leur haut niveau de sous-criticité, les systèmes découplés ADS ont besoin d'une source importante de neutrons. Cela nécessite l'utilisation de puissants accélérateurs, ce qui est économiquement pénalisant car de tels accélérateurs augmentent considérablement le coût de l'installation, mais aussi son coût de fonctionnement en consommant une fraction importante de la puissance électrique produite (à partir de quelques pour cents jusqu'à 10%).

En ce qui concerne la sûreté, il n'existe pas de contrainte, ni sur la valeur du coefficient Doppler ni sur la fraction de neutrons retardés, si le niveau de sous-criticité est suffisamment grand pour éviter toutes les conséquences négatives liées à la variation éventuelles du facteur de multiplication de neutrons k_{eff} (accident de réactivité). Néanmoins il existe un risque d'accident spécifique pour les systèmes découplés ADS : l'insertion accidentelle du courant

maximal du faisceau de protons, ce qui est possible quelle que soit la puissance du cœur en raison de l'alimentation de l'accélérateur par le réseau .

Selon un second type de système dit couplé ou, en anglais, Accelerator Coupled System » (ACS) ou encore « Delayed Enhanced Neutronics » (DEN) (figure 1b), l'intensité de la source externe de neutrons dépend directement de la puissance du cœur et elle est choisie en temps réel de façon à ce que le système entier se trouve dans un état critique. Dans de tels systèmes, la sûreté dépend
5 notamment des paramètres suivants : coefficients de contre-réaction, fraction de neutrons retardés et niveau de sous-criticité. Le pilotage du réacteur ne peut plus s'effectuer comme dans le cas précédent par action de l'opérateur sur la correspondance entre la puissance du cœur et l'intensité de la source externe de neutrons ; ici, le pilotage
10 s'effectuera par d'autres moyens comme par exemple les barres de contrôle de réacteur, ou une modification de la fraction de la puissance du cœur affectée à l'alimentation de l'accélérateur, ou encore l'adjonction éventuelle d'une seconde source de neutrons externes (facultative), de puissance beaucoup plus faible.

Une différence principale entre ces deux systèmes réside dans le fait que, dans un système couplé (ACS), la quantité produite de neutrons externes est prédéterminée afin de maintenir la réaction en chaîne dans le cœur, tandis que, dans un système découplé (ADS), cette intensité varie en temps réel afin d'obtenir la valeur exacte de la
15 puissance souhaitée pour le réacteur.

Dans les systèmes couplés la source externe de neutrons, naturellement ou artificiellement retardés par rapport au taux de fission dans le cœur, peut remplacer un déficit de neutrons retardés. Cette possibilité de suppléer à ces derniers par une source externe
20 donne naissance au concept d'un réacteur où on crée artificiellement un groupe de neutrons retardés ("The Neutron Potential of Nuclear Power for Long Term Radioactivity Risk Reduction", de M. Salvatores, I. Slessarev, M. Uematsu, A. Tchistiakov, Proc. GLOBAL-95 Int. Conf., Versailles, France, September 11-14, 1995, v.1, p.686).

35 Pour accentuer le couplage entre le cœur et l'accélérateur, A.

Gandini, M. Salvatores et I. Slessarev ont proposé dans le document
« Coupling of reactor power with accelerator current in ADS systems »
Accelerator Driven Transmutation Technologies and Applications
Conference, 7-11 juin 1999, Prague et Annals of Nuclear Energy, 27
5 (13) 1147 (2000), d'utiliser pour l'alimentation de l'accélérateur une
partie fixe f de l'énergie produite par le même système hybride, en
l'occurrence le réacteur. Un tel mode de réalisation d'un système
hybride assure l'arrêt intrinsèque de la source externe de neutrons
dans le cas des pannes thermo-hydrauliques ; toutefois il ne protège
10 pas contre un éventuel incident de criticité.

L'ensemble du système nucléaire constitué par le réacteur
nucléaire, l'accélérateur, la cible et l'ensemble des moyens annexes
assurant leur coopération fonctionnelle se comporte alors comme un
réacteur critique dont il présente tous les avantages fonctionnels, et
15 notamment le bénéfice d'effets de contre-réactions internes connus
pour ces derniers (ex. : l'effet Doppler, la dilatation du combustible
nucléaire, etc...) dont la liste dépend des modes de réalisation du
réacteur nucléaire considéré.

Des études des systèmes hybrides, dont les concepts sont
20 présentés ci-dessus, ont montré qu'ils ont une cinétique différente,
surtout pendant des situations accidentelles (ex. : extraction de barre
de contrôle, rupture de la fenêtre de la cible de spallation, panne de
pompe de circulation, etc...) non protégées par une intervention
humaine ou par les automatismes de commande et contrôle. Par
25 conséquent, d'éventuels transitoires non protégés se déroulent
différemment dans les systèmes, ce qui a un grand impact sur la
sûreté. En ce qui concerne cette dernière, chacun des deux systèmes
hybrides a ses avantages et ses inconvénients. Par exemple, le
comportement des systèmes couplés (ACS) est préférable du point de
30 vue des accidents thermo-hydrauliques, par contre, des systèmes
hybrides découplés (ADS) supportent mieux des accidents de
réactivité (augmentation accidentelle de k_{eff} du système). Il s'avère
donc avantageux de combiner des avantages des deux types de
systèmes.

35 Les avantages et inconvénients de ces deux types

fonctionnels de systèmes hybrides sont étudiés dans le document « The accelerator coupled system dynamics » de A. D'angelo et al., Accelerator Driven Transmutation Technologies and Applications Conference, 2001, mais aussi et surtout dans le document « Coupling of reactor power with accelerator current in ADS systems » de A. Gandini, M. Salvatores et I. Slessarev, Accelerator Driven Transmutation Technologies and Applications Conference, 7-11 juin 1999, Prague et Annals of Nuclear Energy, 27 (13) 1147 (2000).

Ils sont schématisés sur la figure 2 dans laquelle l'axe des ordonnées 200 représente l'intensité d'une source de particules chargées et, l'axe des abscisses 202 représente la puissance du cœur du réacteur nucléaire.

Pour un système découplé ADS, l'intensité de la source est constante quelle que soit la puissance du cœur. En particulier, pour une puissance du cœur supérieure à la puissance nominale P_n , l'intensité de la source n'augmente pas, ce qui limite toute augmentation incontrôlée de la puissance fournie par le cœur.

Une telle réalisation hypothétique présente cependant un inconvénient majeur lié à une éventuelle défaillance électronique ou humaine du contrôle de l'accélérateur de particules. Dans ce cas, des accidents thermo-hydrauliques dangereux restent possibles.

Pour un système couplé ACS(DEN), l'intensité de la source varie proportionnellement avec la puissance du cœur. Ainsi, pour une puissance du cœur supérieure à la puissance nominale P_n , l'augmentation de puissance du cœur induit une augmentation proportionnelle de l'intensité de la source de neutrons.

De tels systèmes couplés, qui ont les avantages des systèmes critiques, en ont aussi les inconvénients. Vis-à-vis d'éventuels accidents de réactivité non-protégés, les valeurs asymptotiques d'équilibres sont définies par des effets de contre-réaction. Ces derniers étant dégradés (comme dans le cas de transmutation des déchets) la sûreté diminue aussi.

L'invention vise à réaliser un système ACS dont le comportement idéal dans le cas d'un accident non-protégé serait : au-dessous de sa puissance nominale, le comportement

d'un système ACS connu, et au-dessus de sa puissance nominale, le comportement d'un système ADS connu. En tout état de cause, l'invention a comme objectif de proposer un nouveau procédé de commande qui améliore intrinsèquement la
5 sûreté d'un système couplé.

La présente invention vise à fournir un système combinant les avantages en matière de sécurité des systèmes couplés de façon intrinsèque, c'est-à-dire sans requérir une intervention manuelle ou automatique.

10 **Exposé de l'invention**

La présente invention résulte de la constatation que, pour un accélérateur connu de particules d'un système hybride, l'intensité de la source est supposée être proportionnelle à la puissance du réacteur.

15 Or, si l'intensité de la source de neutrons n'était pas proportionnelle à la puissance du réacteur, cette intensité pourrait augmenter de façon moins importante que l'augmentation en puissance du réacteur de telle sorte que la source ne pourrait plus soutenir cette élévation en puissance du
20 cœur du réacteur.

Par contre, même en l'absence d'une telle proportionnalité entre la puissance de la source et la puissance du réacteur, on pourrait garder l'avantage lié au fait que la diminution de la puissance du cœur entraînerait la diminution
25 d'intensité de la source de neutrons.

Un tel système hybride couplé à interdépendance non-proportionnelle entre l'intensité de la source externe et la puissance du cœur aurait des valeurs asymptotiques de la puissance et de la température limitées. Cette relation de
30 dépendance ci-dessus proposée sur l'état asymptotique du système serait homologue à celle de l'effet Doppler. C'est pourquoi on l'appellera « effet à la Doppler » pour la partie accélérateur d'un ACS. Néanmoins, contrairement à l'effet Doppler proprement dit, un tel « effet à la Doppler » n'est pas
35 altéré pas la présence d'actinides mineurs.

Par ailleurs, l'invention vise alternativement à prolonger le cycle du réacteur et à réduire la quantité de déchets générés par une centrale nucléaire.

De fait, la quantité de déchets produits par une

centrale nucléaire est proportionnelle au taux de combustion de son combustible, ce taux étant d'autant plus faible que le seuil de sûreté appliqué vis-à-vis d'un transitoire accidentel est élevé.

Dès lors, en fournissant un système nucléaire
5 présentant un degré de sûreté accru de façon intrinsèque, l'invention permet de maintenir, pour un système nucléaire, un degré de sécurité identique avec un taux de combustion plus élevé, en réduisant potentiellement la quantité de déchets produite par un réacteur de type industriel, comme par exemple
10 ceux affectés à la production d'électricité.

La présente invention vise ainsi à résoudre les différents problèmes cités ci-dessus, en permettant un fonctionnement autorégulé et fiable d'un système couplé même en présence d'une grande quantité d'actinides, ce qui permet de
15 sécuriser un système nucléaire de façon intrinsèque et, par conséquent, d'utiliser le combustible nucléaire avec un plus grand taux d'utilisation, ou encore de recycler du combustible nucléaire.

Pour obtenir ce résultat, l'invention se fonde non
20 seulement sur le choix d'un point de fonctionnement minimisant l'énergie nécessaire à la production de neutrons, mais plus fondamentalement encore sur les modalités de réglage du nombre de neutrons produits afin de piloter le réacteur et notamment de l'adapter à chaque instant à une puissance de
25 consigne, ce réglage s'effectuant en commandant non plus l'intensité du faisceau de particules mais l'énergie de chacune de ses particules.

Ce choix du point de fonctionnement (qui revient au choix de l'énergie de fonctionnement) vise naturellement à maximiser le
30 rendement énergétique de l'installation nucléaire par minimisation du coût énergétique de production d'un neutron. Il est conforme, dans le mode de réalisation le plus général de l'invention, à ce qui est établi dans le cas des réactions de spallation par le document « Neutron
production in bombardments of thin and thick W, Hg, Pb targets by
35 0.4, 0.8, 1.2, 1.8 and 2.5 GeV protons » de A. Letourneau, J. Galin, F.

Goldenbaum et al in « Nuclear Instruments and Methods in Physics Research » B 170 (2000) pp. 299-322. En particulier, le paragraphe 4.4 « The neutron economy » établit qu'il existe une valeur optimale E_p^{Max} de l'énergie des particules accélérées (dans la plage allant de 0.8 à 1 GeV pour l'expérience mentionnée), pour laquelle le nombre de neutrons produit par un proton incident (rendement de neutrons Y_n) est optimal. Si l'on trace la courbe du nombre de neutrons produits normé par l'énergie ayant servi à les produire (Fig. 16 p. 319), on observe l'existence d'une valeur de pic correspondant à l'énergie des particules optimale E_p^{Max} .

L'existence de ce maximum est liée au fait qu'à basse énergie une fraction importante de l'énergie du faisceau incident est perdue pour ionisation. A très haute énergie une partie de l'énergie se perd sous forme de production d'autres particules que des neutrons (pions essentiellement). En plus, pour une cible dont les dimensions sont fixes, l'augmentation de l'énergie des particules incidentes accroît la probabilité des fuites des particules produisant des neutrons et, de ce fait, diminue le rendement de neutrons dans la cible.

Un second document plus exhaustif arrive aux mêmes conclusions, en situant E_{pMax} entre 1 et 1,5 GeV dans le cadre de cibles de Pb et de plaques W, avec un assemblage sous-critique d'uranium naturel modéré par de l'eau : « Nuclear data at high energy : experiment, theory and applications » de S. Leray, rapport CEA/DAPNIA/SPHN-00-67 et lecture au « Workshop on Nuclear Reaction Data and Nuclear Reactors : physics, design and safety », ICTP Trieste, Italie, 13 mars/14 avril 2000.

On a vu que les réactions photonucléaires sont ici considérées globalement, c'est à dire composées de deux réactions successives. La première est une réaction de Bremsstrahlung, où des électrons réagissent pour donner lieu à des photons de haute énergie selon une section efficace linéaire en fonction de l'énergie des électrons. La seconde réaction produite est la réaction photo-nucléaire proprement dite, cette seconde réaction impliquant des phénomènes analogues à une réaction de spallation. L'ensemble de ces deux réactions successives a bien une courbe globale analogue à celle d'une

spallation, mais avec des valeurs numériques sensiblement différentes (notamment pour E_p^{Max}), comme le montrent les figures 5a et 5b.

Cette propriété d'existence de l'énergie optimale bien qu'elle soit connue, n'a pas de nom propre. On la nommera l'effet de rendement de neutrons ou « effet Y_n » ou encore l'effet « à la Doppler » pour la partie accélérateur d'un système hybride.

On est donc fondé à illustrer le cas général de la production de neutrons par des particules chargées à l'aide du cas particulier bien connu de la spallation induite par protons.

En réalité, pour les dispositifs selon l'art antérieur, le réglage de l'accélérateur dans un ACS se fait en agissant sur l'intensité du faisceau I_p , à énergie constante des particules, ce qui présente divers avantages pour l'homme du métier : les structures d'accélération et de déviation du faisceau étant préréglées, on a pu choisir pour ces réglages préalables (paramétrage) des conditions de fonctionnement correspondant à une meilleure efficacité énergétique.

L'essentiel de l'invention consiste, après avoir choisi le point de fonctionnement minimisant l'énergie nécessaire à la production de neutrons, à régler en continu l'accélérateur de particules non pas par l'intensité du faisceau comme dans l'art antérieur, mais par l'énergie des particules émises.

Plus globalement, l'apport de neutrons externes varie en fonction de l'énergie des particules incidentes E_p , chargés selon une courbe de la fig. 8 du document de S. Leray précité. À mesure que l'énergie E_p croît, le nombre de neutrons croît rapidement dans un premier temps au-delà du seuil de réaction. Puis, au-delà de l'énergie E_p^{Max} , ce nombre continue à croître mais moins rapidement. La forme de cette courbe correspondant à celle de la fig. 8 du document Leray. Si l'on norme cette courbe en divisant le nombre de neutrons produits par l'énergie ayant servi à les produire, on obtient la figure 5a montrant nettement un maximum, la forme de cette courbe correspondant à celle de la fig. 16 du document A. Letourneau et al. précité, et à la fig. 9 du document Leray. Ces courbes de la figure 5a se retrouvent avec la même forme générale, quelle que soit la réaction choisie pour produire des neutrons à partir de particules chargées

(ex. : protons, deutons, électrons). Seules varient les valeurs numériques, notamment celle de l'énergie optimale des particules E_p^{Max} .

Pour une mise en œuvre plus efficace de l'invention, il faut
5 prendre en compte en pratique non seulement le rendement de neutrons par particule incidente et par son énergie E_p , mais aussi l'importance des neutrons ϕ^* (en anglais : « neutron importance », valeur qui décrit l'importance des neutrons externes par rapport aux neutrons du cœur) et le rendement de l'accélérateur η (valeur qui
10 décrit le rapport entre énergie de particule chargée E_p et l'énergie E que l'accélérateur consomme pour accélérer cette particule).

Au préalable, l'énergie optimale E_p^{Max} des particules peut être déterminée empiriquement comme suit. On maintient constante la puissance consommée dans l'accélérateur de particules (P_{cons}), tout
15 en faisant varier simultanément l'énergie des particules et l'intensité du faisceau de particules, comme représenté sur la figure 3a.

En pratique, cette valeur de la puissance P_{cons} sera choisie de manière à ce que la puissance du réacteur nucléaire soit égale à la valeur de consigne que l'on s'est initialement fixée. L'expérience met
20 en évidence, dans tous les cas, une énergie optimale E_p^{Max} de la production de neutrons.

L'invention consiste donc en un procédé de commande d'un système nucléaire couplé (ACS) comprenant un réacteur nucléaire fonctionnant en régime sous-critique et un dispositif générateur de
25 neutrons utilisant un faisceau de particules chargées accélérées, le générateur de neutrons fournissant la quantité de neutrons nécessaire à l'entretien de la réaction nucléaire en chaîne dans le cœur, et le point de fonctionnement du système étant choisi sensiblement autour du point optimal où le rapport du nombre de neutrons externes produits, divisé par l'énergie du faisceau de protons ayant servi à les
30 produire, est maximal, ce procédé étant caractérisé en ce que le réglage du nombre de neutrons externes en fonction des fluctuations de fonctionnement de la puissance du réacteur nucléaire est effectué en agissant sur l'énergie des particules chargées E_p , générées et
35 accélérées par l'accélérateur.

De façon préférentielle, ce procédé comporte les étapes suivantes :

1. Déterminer les conditions de fonctionnement dans lesquelles on souhaite faire fonctionner le réacteur nucléaire : niveau de sous-criticité (r_0), puissance consommable à produire (thermique P_{th} ou électrique $P_{el} = \eta_{el} P_{th}$ où η_{el} est le rendement électrique de l'installation), quantité et nature du combustible (cette détermination fait appel au savoir-faire habituel de l'homme du métier). La réalisation préférentielle du couplage entre le cœur sous-critique et l'accélérateur se fait comme dans le document de A. Gandini, M. Salvatores et I. Slessarev, c'est à dire une fraction fixe f de la puissance produite par le système est consommée pour alimenter l'accélérateur.

2. A partir de ces conditions, déterminer les paramètres de fonctionnement de l'accélérateur comme suit :

- a - Déterminer l'énergie optimale E_p^{Max} des particules chargées, qui vérifie l'expression :

$$d/dE_p [\varphi^*(E_p) \eta_a(E_p) Y(E_p) / E_p] = 0. \quad (1)$$

- Cette formule prend en compte les dépendances éventuelles de l'énergie des particules incidentes E_p du rendement de neutrons Y , de l'importance des neutrons φ^* , du rendement de l'accélérateur η_a .

- b - Choisir l'énergie de fonctionnement (énergie nominale)

E_p^{nom} égale ou supérieure à l'énergie optimale E_p^{Max} :

$$E_p^{nom} = E_p^{Max} + \Delta E_p, \quad \Delta E_p \geq 0. \quad (2)$$

La justification de l'introduction de ΔE_p et la valeur à lui donner seront expliquées ultérieurement.

- c - Déterminer l'intensité nominale du faisceau de particules chargées, nécessaire pour obtenir la puissance nominale du réacteur P_{th}^{nom} en fonction de l'énergie nominale E_p^{nom} , du rendement de neutrons

$Y_n(E_p^{nom})$, du rendement de l'accélérateur $\eta_a(E_p^{nom})$ et de l'importance des neutrons $\phi^*(E_p^{nom})$ pour l'énergie nominale E_p^{nom} :

$$I_p^{nom} = r_0 v P_{th}^{nom} / [E_{fis} \phi^*(E_p^{nom}) Y(E_p^{nom})], \quad (3)$$

5

ainsi que la fraction de la puissance produite P_{el} , consommée par l'accélérateur :

$$f^{nom} = E_p^{nom} r_0 v / [E_{fis} \phi^*(E_p^{nom}) Y(E_p^{nom}) \eta_a(E_p^{nom}) \eta_{el}]. \quad (4)$$

10

3. Fixer la fraction f de la puissance produite par le réacteur qui est consommable par l'accélérateur, ainsi que l'intensité du faisceau des particules incidentes à des valeurs nominales en fonction des formules (3) et (4)

15 4. Régler le nombre de neutrons externes agissant sur l'énergie des particules E_p à intensité constante du faisceau, en fonction des fluctuations de fonctionnement de la puissance du réacteur nucléaire, selon l'expression déterminant la variation de l'énergie :

$$20 \quad E_p = f^{nom} P_{el} \eta_a(E_p) / I_p^{nom} \quad (5)$$

On explique ci-après les formules et l'approche présentées ci-dessus.

25 L'énergie E , qu'il faut dépenser pour accélérer une particule jusqu'à l'énergie E_p , dépend du rendement de l'accélérateur η_a : $E = E_p / \eta_a$. Ce rendement lui-même peut dépendre de l'énergie maximale jusqu'à laquelle on accélère les particules chargées : $\eta_a = \eta_a(E_p)$. Donc la puissance consommée pour l'accélération de I_p particules par seconde, peut être exprimée par :

30

$$P_{cons} = E_p I_p / \eta_a. \quad (6)$$

En tenant compte qu'une particule incidente d'énergie E_p crée en moyenne Y_n neutrons, l'intensité de la source de neutrons sera

liée à la valeur de courant du faisceau :

$$I_n = I_p Y_n, \quad (7)$$

L'énergie thermique E_{th} , créée dans un cœur sous-critique
5 par un neutron externe γ absorbé est :

$$E_{th} = E_{fis} \varphi^* / (v r_0) \quad (8)$$

où $r_0 = (1 - k_{eff}) / k_{eff}$ est le niveau de sous-criticité ; φ^* est l'importance
des neutrons ; E_{fis} est l'énergie délivrée lors d'une réaction de fission ;
10 v est le nombre moyen de neutrons de fission. L'importance des
neutrons dépend à priori de l'énergie des particules incidentes, c'est-à-
dire $\varphi^* = \varphi^*(E_p)$. Toutefois, dans certains systèmes on constate qu'il
est possible de l'assimiler à une constante. La puissance thermique du
cœur sous-critique (si on ne prend pas en compte énergie dégagée
15 dans la cible) est :

$$P_{th} = (\varphi^* \eta_a Y_n / E_p) P_{cons} E_{fis} / (v r_0) \quad (9)$$

En supposant que la puissance consommée P_{cons} est fixée,
on peut choisir l'énergie optimale des particules chargées $E_p = E_p^{Max}$
20 afin que la puissance du cœur soit maximale. Cette condition signifie
que $dP_{th}(E_p^{Max})/dE_p = 0$, $d^2P_{th}(E_p^{Max})/dE_p^2 < 0$. Lorsque cette valeur
existe, l'énergie optimale sera définie par l'expression (1).

Dans de rares cas, il se peut que ce point optimal,
25 visible sur la figure 5b (courbe A), soit peu marqué en raison
d'une pente très faible aux énergies de particules les plus
élevées, et éventuellement de l'imprécision des mesures. Dans
ces cas, on peut accentuer ce maximum, et donc l'« effet Y_n »,
en optimisant la géométrie de la cible, par exemple dans le sens
30 d'une augmentation des pertes de particules incidentes dans la
cible. Bien que cela diminue l'efficacité de production des
neutrons, cela permet en contrepartie de profiter davantage de
l'« effet Y_n ». On peut aussi augmenter l'« effet Y_n » en
modifiant la cible, soit en diminuant ses dimensions, soit en
35 l'entourant d'un éventuel « buffer » (tampon), le plus

transparent possible aux neutrons déjà créés et dont le rendement de conversion neutronique est inférieur à celui de la cible, soit encore par une combinaison de ces deux conditions. Ce rendement de conversion doit être le plus faible possible, et
5 préférentiellement inférieur à la moitié du rendement de conversion de la cible proprement dite.

Dans le cas particulier des réactions photonucléaires, la figure 5b montre à titre d'exemple que les formes de courbes sont globalement les mêmes, avec trois configurations
10 correspondant à :

- courbe A (en haut) : cible d'uranium 238, en forme de pastille cylindrique d'axe de symétrie confondu avec l'axe du faisceau de particules, cette pastille ayant un diamètre de 4 cm et une hauteur de 4 cm, cette cible étant entourée d'un
15 « buffer » absorbant en plomb, en forme de cylindre d'axe de symétrie confondu avec l'axe du faisceau de particules, ce cylindre ayant un diamètre de 40 cm et une hauteur de 80 cm, et comportant un alésage axial de 4 cm permettant au faisceau d'atteindre la cible proprement dite située au centre de ce
20 cylindre amortisseur,

- courbe B (au milieu) : cible d'uranium 238, en forme de pastille cylindrique d'axe de symétrie confondu avec l'axe du faisceau de particules, cette pastille ayant un diamètre de 4 cm et une hauteur de 2 cm, cette cible étant entourée d'un
25 « buffer » absorbant en plomb identique à celui de la configuration correspondant à la courbe A,

- courbe C (en bas) : cible d'uranium 238 conforme à celle de la configuration correspondant à la courbe B, et absence de « buffer » absorbant.

30 On remarque néanmoins que la courbe A présente une quasi absence de maximum. Dans de tels cas, on peut faire apparaître un maximum par les mêmes modifications de cible que déjà vues pour les réactions de spallation.

35 Ce mode de commande par l'énergie des particules issues de l'accélérateur conduit à ce que la source externe de

neutrons ne soit plus exactement proportionnelle à la puissance du cœur. Il y a apparition d'un nouvel effet de contre-réaction «à la Doppler » pour la partie accélérateur du système hybride couplé, qui stabilise la puissance le système pendant les transitoires non protégés.

Un avantage de l'invention peut être illustré en considérant une variation brusque de puissance dans un système nucléaire, par exemple dans le sens d'une augmentation des neutrons produits.

Dans ce cas, il résulte une augmentation de chaleur dégagée dans le cœur, puis de l'énergie électrique qui alimente l'accélérateur.

A cela, les systèmes ACS selon l'art antérieur répondaient par une action augmentant l'intensité du faisceau de protons, ce qui faisait croître relativement rapidement le nombre de neutrons extérieurs, conformément à la courbe 404 de la figure 4. Au contraire, selon l'invention une augmentation brusque de la puissance dans le cœur, le système selon l'invention répond par une augmentation de l'énergie des particules conforme à la courbe 406 de la figure 4.

En d'autres termes, la montée en puissance du réacteur est plus lente et, compte tenu d'effets autorégulateurs tels que l'effet Doppler, la valeur finale de la puissance du réacteur sera moindre, par rapport à l'art antérieur.

Ainsi, en régulant un système ACS par l'énergie des particules issues d'accélérateur, on munit ce système d'un moyen de sécurité intrinsèque s'ajoutant aux autres effets de contre-réaction connus dans l'art antérieur puisque, en cas d'augmentation incontrôlée de la puissance du cœur au-delà du point de fonctionnement nominal (c'est-à-dire correspondant aux conditions initiales), l'énergie des particules incidentes augmente suffisamment pour écarter ce point de fonctionnement de sa valeur optimale, correspondant au rendement maximal de la conversion. Ainsi le nombre de

neutrons augmente, mais beaucoup moins rapidement qu'il ne le ferait dans le cas d'un système ACS régulé par l'intensité du faisceau de particules chargées. Dès lors, l'augmentation en puissance du réacteur est à la fois plus lente et nettement plus limitée en amplitude que pour les systèmes ACS selon l'art
5 antérieur.

Par ailleurs, on remarque que l'évolution des deux systèmes tend vers des puissances limites distinctes, à savoir une puissance P_{connu} pour un système ACS régulé par l'intensité du faisceau de
10 particules, et une puissance P_{inv} telle que $P_{\text{inv}} < P_{\text{connu}}$ pour un système conforme à l'invention, c'est-à-dire un système ACS régulé par l'énergie des particules.

Comme on l'a vu avec la figure 5a, outre la mise en évidence d'une valeur maximisant le rendement des réactions
15 nucléaires produisant des neutrons, la figure 5a montre que l'invention permet de définir trois régimes de fonctionnement de la source de neutrons, ces régimes correspondant graphiquement à trois zones de la figure. Ces régimes sont déterminés par des valeurs de l'énergie des particules E_p , et
20 correspondent à différentes réponses du rendement des réactions nucléaires produisant des neutrons à des fluctuations éventuelles de la puissance du cœur et, par conséquent, à l'énergie E_p .

1 - Une première zone, dite « dangereuse », apparaît
25 pour un accélérateur générant des particules munies d'une énergie à partir de l'énergie du seuil de la réaction et inférieure à E_p^{Max} , qui, dans l'exemple, correspond à 1,16 GeV. Lorsque l'énergie des particules est inférieure à E_p^{Max} , le rendement est faible, d'autant plus que l'on s'éloigne de E_p^{Max} . En outre, une
30 légère fluctuation de l'énergie des particules induit une très forte fluctuation du nombre de neutrons produit, ce qui rend le pilotage du système hybride très délicat.

2 - Une seconde zone, dite « d'instabilité potentielle », est
située au voisinage de l'optimum de l'accélérateur. Le rendement des
35 réactions nucléaires produisant des neutrons est optimal, ce qui

optimise le bilan énergétique du système hybride. Toutefois ce régime peut basculer vers le régime « dangereux ». En termes de sûreté, une évolution vers le régime « dangereux » ne compromet pas la sécurité du système car cette évolution se produit lors d'une baisse de
5 puissance produite par le réacteur.

Autrement dit, le système peut devenir instable par rapport à des fluctuations négatives de la puissance, ce qui est indésirable pour le pilotage du système.

3 - Une troisième zone, dite d'« effet à la Doppler »,
10 correspond à une zone où le rendement des réactions nucléaires produisant des neutrons est très proche de sa valeur optimale, mais diminue au fur et à mesure que la puissance requise augmente. Cette pente négative de la courbe de la figure 5a tend à limiter le nombre de neutrons lors d'un transitoire non voulu augmentant ce nombre de
15 neutrons : on bénéficie de façon plus favorable de l'effet régulateur de l'invention, qui agit dans le même sens que l'effet Doppler, et qui est particulièrement avantageux lorsque la présence d'actinides réduit l'influence de cet effet Doppler.

Pour éviter l'instabilité potentielle de la zone 2, il vaut
20 mieux, conformément à une réalisation préférentielle de l'invention, choisir

$$E_p^{nom} = E_p^{Max} + \Delta E_p$$

où la valeur ΔE_p est choisie de manière à être plus importante que
25 d'éventuelles fluctuations négatives de la puissance du réacteur dans le régime normal de fonctionnement du réacteur. C'est cette valeur de E_p^{nom} , ainsi choisie, qui marque le début de la troisième zone représentée sur la figure 5a.

30 L'invention concerne aussi un système nucléaire hybride couplé (ACS), comportant un réacteur nucléaire fonctionnant en régime sous-critique, une source de neutrons externes, cette source comportant un faisceau de particules chargées accélérée, la source de neutrons fournissant la quantité de neutrons nécessaire à l'entretien
35 de la réaction nucléaire, et des moyens aptes à générer de l'électricité

à partir de la chaleur produite par le cœur nucléaire, ce système étant caractérisé en ce que le nombre de neutrons induits par l'accélérateur est commandé en agissant sur l'énergie E_p des particules, à intensité constante du faisceau de particules.

5 Un exemple d'une telle réalisation est fourni en tant qu'exposé détaillé du mode préférentiel de réalisation.

De façon préférentielle, les particules sont des protons dirigés en faisceau au centre du cœur, et le cœur comporte une cible de spallation.

10 Le pilotage de ce système peut se faire selon l'art antérieur, par exemple avec les barres de contrôle ainsi que selon d'autres possibilités avec l'accélérateur (l'énergie étant fournie par réseau).

La présente invention est susceptible de s'appliquer à tout type de réacteur nucléaire, dès lors que pendant au moins une partie
15 de son cycle de fonctionnement, il est apte à fonctionner dans un état sous-critique, rendu critique par apport de neutrons externes produits à partir de particules chargées accélérées. Ainsi le réacteur peut être rapide ou à neutrons thermiques. Il peut aussi avoir un fonctionnement critique pendant la plus grande partie de son
20 fonctionnement, et n'avoir un fonctionnement sous-critique, tel que décrit ci-dessus, que de manière temporaire ou occasionnelle.

De fait, l'invention s'applique à tout type de réacteur nucléaire sous-critique alimenté au moyen d'une source extérieure présentant une valeur optimale de rendement dans sa production de
25 neutrons, et utilisant un accélérateur de particules permettant de commander l'énergie des particules.

Pour utiliser l'invention dans un système nucléaire hybride couplé, seules deux conditions sont requises : d'une part que les réactions nucléaires produisant les neutrons s'effectuent selon une
30 courbe globale présentant une valeur maximale de rendement, comme c'est notamment le cas pour la spallation et les réactions photo-nucléaires considérées globalement ; et d'autre part que l'accélérateur utilisé puisse, de manière directe ou indirecte, être piloté en énergie des particules à intensité constante du faisceau. Tout cœur
35 de réacteur auquel on adjoint, fut-ce de manière temporaire, une

source de neutrons externes est à considérer comme un système nucléaire hybride.

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront avec la description effectuée ci-dessous à titre illustratif et non limitatif en faisant référence aux figures ci-jointes sur lesquelles :

Les figures 1a et 1b, déjà décrites, sont des schémas fonctionnels de systèmes hybrides nucléaires,

la figure 2, déjà décrite, est un diagramme représentant les relations entre l'intensité de la source de neutrons de spallation et la puissance du cœur d'un réacteur nucléaire pour différents systèmes hybrides,

la figure 3a est un diagramme 300 représentant, selon l'axe des ordonnées 302, la variation du courant de particules émis par un accélérateur en fonction de l'énergie E_p (axe des abscisses 304) de ces particules, cette figure 3a étant ainsi un diagramme relatif au courant I_p des particules produites par un accélérateur en fonction de l'énergie de ces particules pour une valeur donnée de la puissance consommée par l'accélérateur,

la figure 3b est un diagramme relatif au rendement de production de neutrons pour différentes combinaisons d'énergie des particules générant ces neutrons et d'intensité du faisceau, ces combinaisons étant définies à puissance consommée par accélérateur fixée,

la figure 4 est un diagramme comparant l'augmentation en puissance d'un système nucléaire couplé selon l'art antérieur avec un système selon l'invention ,

Les figures 5a et 5b sont des diagrammes représentant le nombre de neutrons extérieurs produits normé par l'énergie ayant servi à les produire (axe y), en fonction de l'énergie des particules incidentes (axe x) une application de deux modes de réalisation de l'invention : avec des réactions de spallation pour la figure 5a, et avec des réactions photonucléaires pour la figure 5b.

Les figures 6a, 6b, 6c et 6d sont des diagrammes montrant l'efficacité d'un procédé conforme à l'invention.

Description détaillée du mode de réalisation préférentiel : un système hybride à sel fondu avec source de spallation

Dans cet exemple de réalisation de l'invention on prévoit un système couplé ACS avec un cœur à sel fondu (à spectre rapide avec combustible circulant à support Thorium). On suppose que le rendement de l'accélérateur η_a ne dépend pas de l'énergie E_p . Selon cette condition, l'énergie des particules chargées est proportionnelle à la puissance produite. Étant donné, que cette dernière est proportionnelle à la puissance consommée par l'accélérateur et en normalisant par rapport la puissance nominale, on obtient l'énergie des particules incidentes :

$$E_p = E_p^{\text{nom}} P_{\text{cons}} / P_{\text{cons}}^{\text{nom}}. \quad (10)$$

Pour un combustible en Thorium, la probabilité de fission du principal isotope fissile, l'uranium 233, dépend peu de l'énergie des neutrons, on peut considérer l'importance des neutrons constante et égale à 1 : $\phi^* = 1$.

La puissance du cœur P_c dans un nouvel état d'équilibre (après insertion de réactivité $\Delta\rho_{\text{TOP}}$) peut être trouvée à partir de l'expression:

$$(\Delta\rho_{\text{TOP}} + \Delta\rho_{\text{FB}} - r_0)P_c + r_0 P_{\text{cons}}^{\text{nom}} Y(E_p) / Y(E_p^{\text{nom}}) = 0 \quad (11)$$

On décrit des effets de contre-réaction dans le cœur par un modèle linéaire :

$$\Delta\rho_{\text{FB}} = A_{\text{FB}} \Delta P_c$$

où A_{FB} est le coefficient de contre-réaction.

On considérera que pour la production des neutrons on utilise une réaction de spallation par des protons de haute énergie (~ 1 GeV). Le rendement des neutrons par un proton incident dans une cible de plomb (de dimensions : diamètre $D = 20\text{cm}$ et longueur $L = 60\text{cm}$, énergie des particules E_p comprise entre 0,8 et 8 GeV) peut être exprimé par la formule empirique, présentée dans le document de Pankratov et al. "Secondary Neutron Yields from Thick Pb and W Targets Irradiated by Protons with Energy 0.8 and 1.6 GeV".

Proceedings of the Second International Conference on Accelerator-Driven Transmutation Technologies and Applications, Kalmar, Sweden, V2 (1996), PP. 694-697:

$$Y_n(E_p) = -a + bE_p^{3/4},$$

5

où E_p est mesuré en GeV et les paramètres empiriques a et b sont : $a = 8,2$; $b = 29,3$.

Comme on le voit sur la Figure 5a, la production de neutrons est optimale pour une énergie égale à : $E_p = (4a/b)^{4/3} = 1,16$ GeV. Si l'on choisit cette énergie comme énergie nominale des protons, en cas d'augmentation de la puissance du cœur, la source extérieure n'arrivera plus à créer une quantité suffisante de neutrons pour soutenir l'état critique d'équilibre de neutrons dans le système hybride (neutrons de fission plus neutrons externes). On peut dire que le système (on peut l'appeler DENNY ou Delayed Enhanced Neutronics with Non-linear neutron Yield) a un nouvel effet de contre-réaction « à la Doppler » pour la partie accélérateur (« effet Y_n »), qui peut aussi être utilisé pour l'amélioration de la sûreté.

Pour illustrer la grandeur de l'« effet Y_n », on compare à titre d'exemple, deux systèmes : d'une part un ACS avec la dépendance linéaire (conforme à l'art antérieur) entre l'intensité de la source, et d'autre part un « DENNY » (conforme à l'invention). Pour décrire l'efficacité de l'« effet Y » on introduit le paramètre $\delta = P^{\text{DENNY}}/P^{\text{ACS}}$, qui est le rapport des puissances asymptotiques du DENNY et du ACS (DEN) après avoir introduit la même valeur de la réactivité $\Delta\rho_{\text{TOP}}$. Le fait que $\delta < 1$ signifie que la puissance asymptotique dans le DENNY est moins importante que celle du système ACS.

Les résultats de calcul de δ en fonction des paramètres r_0 et $\Delta\rho_{\text{TOP}}$ sont présentés sur les Figures 6a à 6d. Trois valeurs d'énergie nominale ont été choisies : $E_p^{\text{nom}} = 1,16$ GeV (a), $E_p^{\text{nom}} = 1,60$ GeV (b) et $E_p^{\text{nom}} = 0,80$ GeV (c). La comparaison de ces résultats permet de formuler les conclusions suivantes :

- l'« effet Y_n » augmente lorsque r_0 et $\Delta\rho_{\text{TOP}}$ augmentent. Cet effet peut être important : jusqu'à 10 ou 15% pour $r_0 = 5\beta$.

30

L'augmentation de $\Delta\rho_{\text{TOP}}$ entraîne la saturation de cette tendance ;

- l'« effet Y_n » devient plus important si l'énergie nominale des protons est augmentée au-delà de l'énergie optimale;
- 5 - dans l'exemple étudié, la valeur optimale d'énergie des particules $E_p^{\text{max}} = 1,16$ GeV, est bien adaptée aux transitoires d'amplitude relativement faible, ce qui est lié à la dépendance non-linéaire.

L'efficacité relative de l'« effet Y_n » vis à vis de l'effet Doppler dépend beaucoup des paramètres thermo-hydrauliques du système hybride. Pour estimer l'influence de ces paramètres, on peut
10 examiner la dépendance de δ du paramètre A_{FB} , qui décrit les effets de contre-réaction ainsi que les propriétés thermo-hydrauliques du système. Le résultat du calcul, présenté sur la Figure 6d, montre que l'effet de diminution de l'excursion de la puissance est moins important
15 si le paramètre A_{FB} s'accroît.

REVENDEICATIONS

1. Procédé de commande d'un système nucléaire couplé (ACS) comprenant un réacteur nucléaire fonctionnant en régime sous-critique et un dispositif générateur de neutrons utilisant un faisceau de particules chargées accélérées, le
 5 générateur de neutrons fournissant la quantité de neutrons nécessaire à l'entretien de la réaction nucléaire en chaîne dans le coeur, et le point de fonctionnement du système étant choisi sensiblement autour du point optimal où le rapport entre le
 10 nombre de neutrons externes produits, et l'énergie du faisceau de protons ayant servi à les produire, est maximal, ce procédé étant caractérisé en ce que le réglage du nombre de neutrons externes en fonction des fluctuations de fonctionnement de la puissance du réacteur nucléaire est effectué en agissant sur
 15 l'énergie des particules chargées (E_p) générées et accélérées par l'accélérateur.

2. Procédé de commande d'un système nucléaire couplé (ACS) conforme à la revendication 1, caractérisé en ce qu'il comprend les étapes suivantes :

20 1. déterminer les conditions de fonctionnement dans lesquelles on souhaite faire fonctionner le réacteur nucléaire : niveau de sous-criticité (r_0), puissance consommable à produire, thermique P_{th} ou électrique $P_{el} = \eta_{el} P_{th}$, où η_{el} est le rendement électrique de l'installation, quantité et
 25 nature du combustible,

2. à partir de ces conditions, déterminer les paramètres de fonctionnement de l'accélérateur comme suit :

a - déterminer l'énergie optimale E_p^{Max} des particules chargées, qui vérifie l'expression :

$$30 \quad d/dE_p [\Phi^*(E_p) \eta_a(E_p) Y_n(E_p) / E_p] = 0 \quad (1)$$

où E_p est l'énergie des particules incidentes, Y_n le rendement de neutrons, Φ^* l'importance des neutrons, et η_a le rendement de l'accélérateur,

b - choisir l'énergie de fonctionnement (énergie nominale) E_p^{nom} égale ou supérieure à l'énergie optimale E_p^{Max} :

$$E_p^{nom} = E_p^{Max} + \Delta E_p, \quad \Delta E_p \geq 0, \quad (2)$$

c - déterminer l'intensité nominale I_p^{nom} du faisceau de particules chargées, nécessaire pour obtenir la puissance nominale du réacteur P_{th}^{nom} en fonction de l'énergie nominale E_p^{nom} , du rendement de neutrons $Y_n(E_p^{nom})$, du rendement de l'accélérateur $\eta_a(E_p^{nom})$, du nombre moyen ν de neutrons de fission, de l'énergie E_{fis} délivrée dans une réaction de fission, et de l'importance des neutrons $\Phi^*(E_p^{nom})$ pour l'énergie nominale E_p^{nom} :

$$I_p^{nom} = r_0 \nu P_{th}^{nom} / [E_{fis} \Phi^*(E_p^{nom}) Y_n(E_p^{nom})], \quad (3)$$

ainsi que la fraction de la puissance produite par le réacteur qui est consommée par l'accélérateur :

$$f^{nom} = E_p^{nom} r_0 \nu / [E_{fis} \Phi^*(E_p^{nom}) Y_n(E_p^{nom}) \eta_a(E_p^{nom}) \eta_{el}], \quad (4)$$

3. fixer la fraction f de la puissance produite par le réacteur et qui est consommable par l'accélérateur ainsi que l'intensité du faisceau des particules incidentes à des valeurs nominales selon les formules suivantes :

$$I_p^{nom} = r_0 \nu P_{th}^{nom} / [E_{fis} \Phi^*(E_p^{nom}) Y_n(E_p^{nom})], \quad (3)$$

$$f^{nom} = E_p^{nom} r_0 \nu / [E_{fis} \Phi^*(E_p^{nom}) Y_n(E_p^{nom}) \eta_a(E_p^{nom}) \eta_{el}], \quad (4)$$

4. régler le nombre de neutrons extérieurs agissant sur l'énergie des particules E_p à intensité constante du faisceau, en fonction des fluctuations de fonctionnement de la puissance du réacteur nucléaire, selon l'expression déterminant la variation de l'énergie :

$$E_p = f^{nom} P_{el} \eta_a(E_p) / I_p^{nom}. \quad (5)$$

3. Procédé de commande d'un système nucléaire couplé conforme à la revendication 1 ou 2, dans lequel le point de fonctionnement a une énergie E_p des particules égale à la valeur optimale E_p^{Max} de cette énergie des particules.

4. Procédé de commande d'un système nucléaire couplé conforme à la revendication 1 ou 2, dans lequel le point de fonctionnement a une énergie E_p des particules supérieure à la valeur optimale E_p^{Max} de cette énergie des particules.

5. Procédé de commande d'un système nucléaire couplé conforme à la revendication 4, dans lequel le point de fonctionnement a une énergie E_p des particules égale à $E_p^{Max} + \Delta E_p$, où E_p^{Max} est la valeur optimale de cette énergie des particules et où la valeur ΔE_p est choisie de manière à être plus importante que d'éventuelles fluctuations négatives de la puissance du réacteur dans le régime normal de fonctionnement du réacteur.

6. Procédé de commande d'un système nucléaire couplé conforme à l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel les particules sont des protons, et la réaction nucléaire génératrice de neutrons est une réaction de spallation.

7. Procédé de commande d'un système nucléaire couplé conforme à la revendication 6, dans lequel la cible de spallation est en plomb-bismuth, et l'énergie optimale E_p^{Max} des protons est comprise entre 0,5 et 2,5 GeV.

8. Procédé de commande d'un système nucléaire couplé conforme à l'une quelconque des revendications 1 à 4, dans lequel les particules sont des électrons, et la réaction nucléaire génératrice de neutrons est une réaction photonucléaire.

9. Système nucléaire couplé comprenant un réacteur nucléaire fonctionnant en régime sous-critique et un dispositif générateur de neutrons utilisant un faisceau de particules chargées accélérées, le générateur de neutrons fournissant la

quantité de neutrons nécessaire à l'entretien de la réaction nucléaire, caractérisé en ce que le nombre de neutrons induits par l'accélérateur est commandé en agissant sur l'énergie E_p des particules, à intensité constante du faisceau de particules.

5 **10.** Système nucléaire couplé conforme à la revendication 9, pour lequel les particules chargées sont des protons dirigés en faisceau au centre du cœur, et le cœur comporte une cible de spallation.

10 **11.** Système nucléaire couplé conforme à la revendication 9 ou 10, pour lequel l'énergie nominale E_p des particules est supérieure à la valeur E_{pMax} optimisant le rendement de la réaction nucléaire produisant les neutrons.

15 **12.** Système nucléaire couplé conforme à l'une quelconque des revendications 9 à 11, dans lequel la cible proprement dite est entourée d'un « buffer » dont le rendement de conversion est inférieur à la moitié du rendement de conversion de la cible proprement dite .

1/5

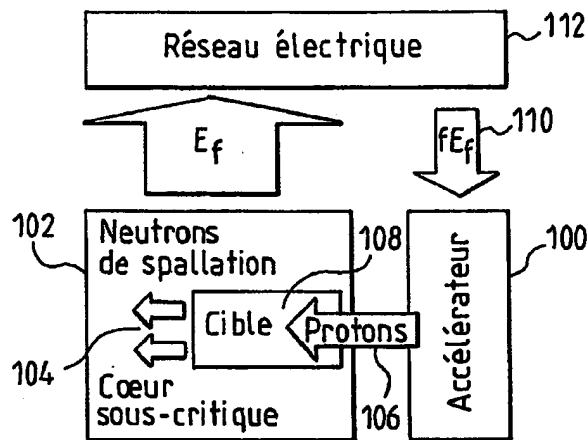


FIG. 1a

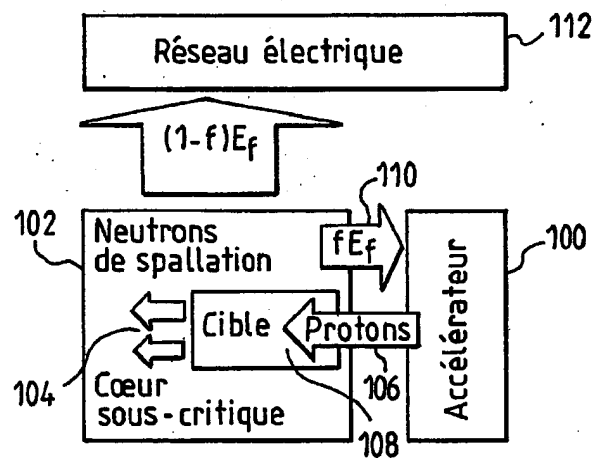


FIG. 1b

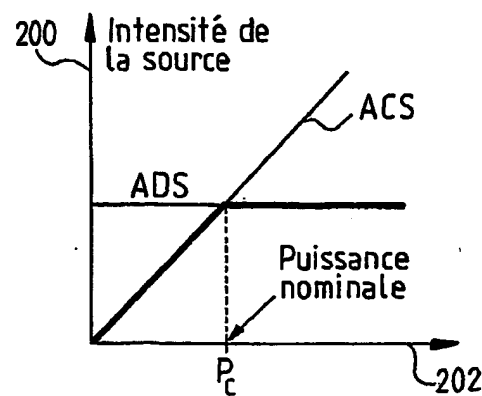


FIG. 2

2/5

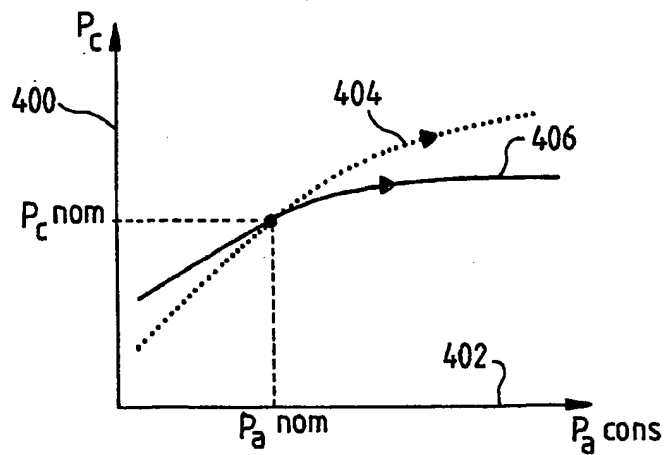
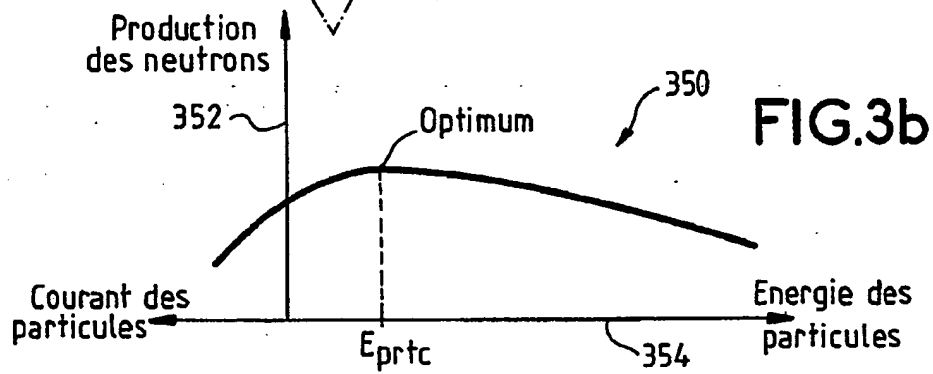
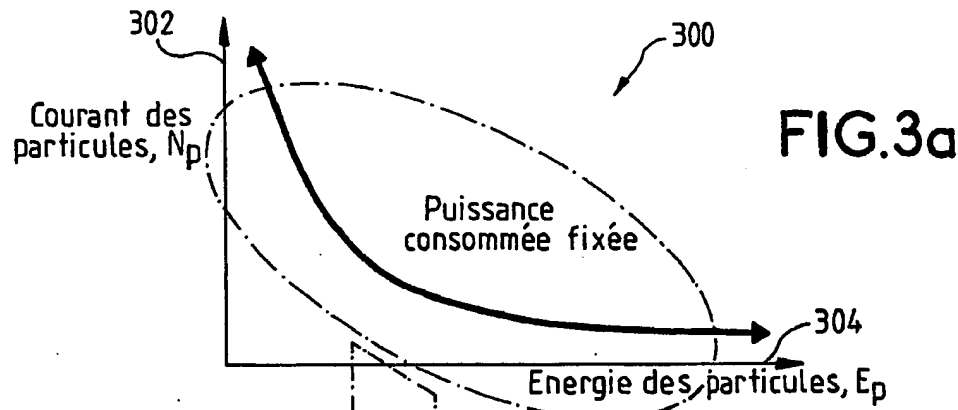


FIG. 4

3/5

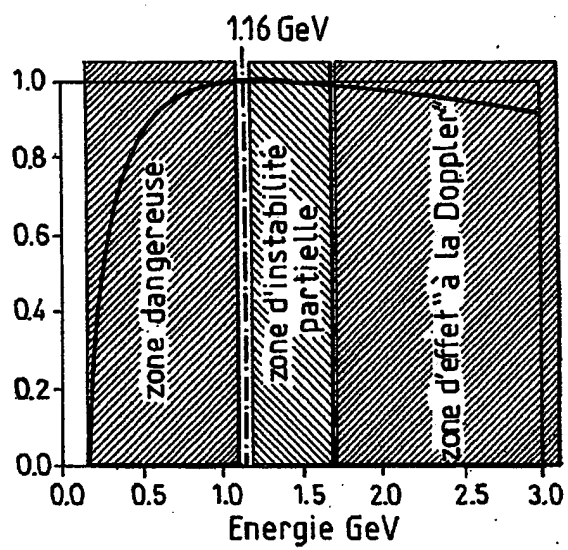
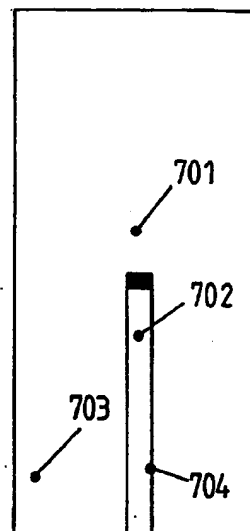


FIG.5a

4/5

701 . Cible
 702 . Faisceau
 703 . Buffer
 704 . Tube de
 l'accélérateur

**Configuration A :**

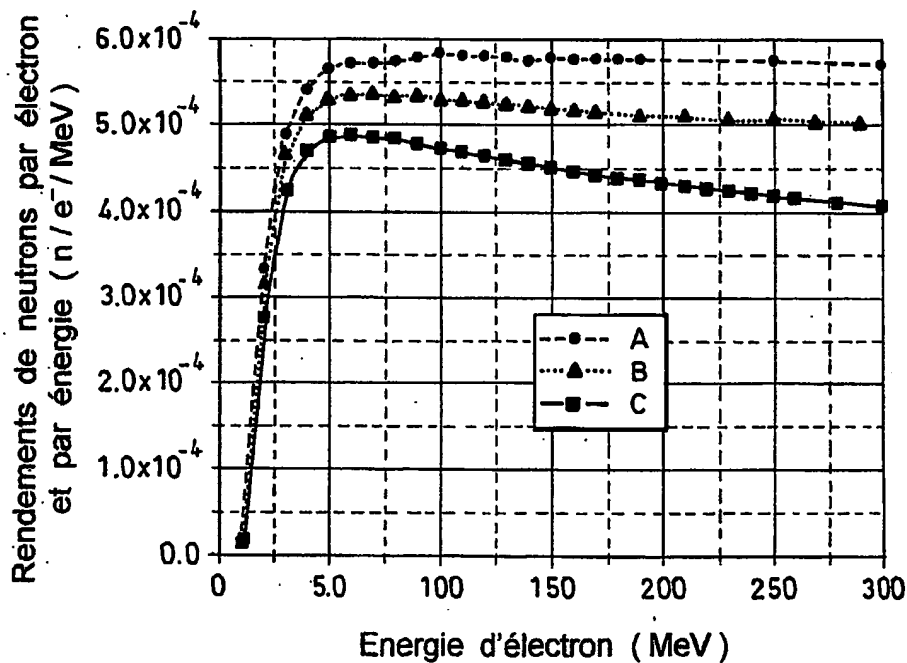
cible : ^{238}U , $D_{\text{cible}} = 4 \text{ cm}$, $L_{\text{cible}} = 4 \text{ cm}$
 buffer : $^{\text{nat}}\text{Pb}$, $D_{\text{buffer}} = 40 \text{ cm}$, $L_{\text{buffer}} = 80 \text{ cm}$

Configuration B :

cible : ^{238}U , $D_{\text{cible}} = 4 \text{ cm}$, $L_{\text{cible}} = 2 \text{ cm}$
 buffer : $^{\text{nat}}\text{Pb}$, $D_{\text{buffer}} = 40 \text{ cm}$, $L_{\text{buffer}} = 80 \text{ cm}$

Configuration C :

cible : ^{238}U , $D_{\text{cible}} = 4 \text{ cm}$, $L_{\text{cible}} = 2 \text{ cm}$
 buffer : *absent*

**FIG. 5b**

5/5

